

**Matti Arvola**

# **PIENVESIVOIMAN VERKKOONLIITTÄMINEN**

**Opinnäytetyö  
CENTRIA AMMATTIKORKEAKOULU  
Sähkötekniikan koulutusohjelma  
Marraskuu 2012**

## TIIVISTELMÄ OPINNÄYTETYÖSTÄ

<b>Yksikkö</b> Centria ylivieska	<b>Aika</b> Marraskuu 2012	<b>Tekijä</b> Matti Arvola
<b>Koulutusohjelma</b> Sähkötekniikan koulutusohjelma		
<b>Työn nimi</b> PIENVESIVOIMAN VERKKOONLIITTÄMINEN		
<b>Työn ohjaaja</b> Kyösti Terentjeff		<b>Sivumäärä</b> 30+1
<b>Työelämäohjaaja</b> -		
<p>Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli suunnitella ja toteuttaa pienvesivoimalan sähköverkkoon liittämiseen tarvittava laitteisto. Työssä pyrittiin etsimään mahdollisimman kustannustehokas, varmatoiminen ja mahdollisuuksien mukaan säädettävä verkkoonliittymislaitteisto.</p> <p>Insinööriytyössä käsitellään voimalan rakennetta ja sen toimintaa erilaisissa luonnon olosuhteissa. Rakennerratkaisuissa esitellään erilaiset vesivoimassa käytettävät turbiinimallit. Lisäksi työssä käsitellään voimaloita koskevia lakimääräyksiä, joita on niin ympäristöä koskevia määräyksiä kuin sähköistä liitانتää koskevia määräyksiä.</p> <p>Työn lopussa olevassa yhteenvedossa kerrotaan mihin ratkaisuihin päädyttiin ja miksi. Tässä myös pohditaan miten työ onnistui.</p>		
<b>Asiasanat</b>		
Vesivoima, Generaattori, Taajuusmuuttaja		

## ABSTRACT

<b>Unit</b> Centria ylivieska	<b>Date</b> November 2012	<b>Author</b> Matti Arvola
<b>Degree of programme</b> Electrical engineering		
<b>Name of thesis</b> SMALL HYDROELECTRIC POWER PLANT GRID CONNECTION		
<b>Supervisor</b> Kyösti Terentjeff		<b>Pages</b> 30+1
<b>Instructor</b> -		
<p>Purpose of this thesis was to design and implement a small hydroelectric power plant grid connection of the necessary equipment. The study aimed to find the most cost-effective, reliable, and, where possible, provide grid connection equipment.</p> <p>The thesis deals with the plant structure and functions of the natural effects of different conditions. Construction are presented in a variety of water used to force the turbine models. In addition, the report presents the provisions of the law power plants that are both environmental provisions in the electrical circuit of the regulations.</p> <p>At the end of the summary, a description of the decisions were reached and why. At the end is also evaluated how this work managed.</p>		
<b>Keywords</b>  hydroelectric power plant, Generator, frequency inverter		

# SISÄLLYS

## TIIVISTELMÄ ABSTRACT

1 JOHDANTO.....	1
2 YLEISTÄ SÄHKÖN TUOTTAMISESTA.....	2
3 LUVAT.....	3
4 JAOTTELU VERKKOLIITÄNNÄN MUKAAN.....	4
4.1 Verkosta erotetut voimalat.....	4
4.2 Verkon rinnalla toimiva tuotanto.....	5
5. SUOJAUS.....	6
5.1 Sähkön laatu.....	8
5.2 Tahdistus.....	9
6 SUUNNITTELU.....	12
6.1 Turbiini.....	13
6.2 Generaattori.....	15
6.2.1 Tasasähkögeneraattori.....	16
6.2.2 Vaihtosähkögeneraattorit.....	16
6.3 Verkkoonliityntälaitteisto.....	18
7 TAAJUUSMUUTTAJA.....	19
7.1 Toiminta.....	19
7.2 Rakenne.....	19
8 KUSTANNUKSET.....	22
8.1 Käyttökustannukset.....	22
8.2 Huollot.....	22
8.3 Laskelmat.....	23
9 TOTEUTUS.....	25
9.1 Turbiini.....	25
9.2 Generaattori.....	26
9.3 Verkkoonliityntä laitteisto.....	26
10 LOPPUPÄÄTELMÄ.....	29

## LÄHTEET LIITTEET

## 1 JOHDANTO

Tässä insinöörityössä käsitellään pienvesivoimalan rakentamista ja sen erilaisia rakenneratkaisuja. Voimala rakennetaan Haapajärven Kalakankaalle vanhan myllyn tilalle Kalajanjoen sivu-uomaan. Työn tarkoituksena oli suunnitella ja toteuttaa voimalaan tarvittavat tuotetun sähkön verkkoon syöttöön liittyvät osat. Suunnittelussa käsitellään myös hieman vesivoiman erilaisia turbiineita ja otetaan huomioon niiden vaikutukset sähkön tuotannossa.

Työssä käsitellään erilaisien generaattorien toimintaa ja niiden tarvitsevia verkkoon liittämislaitteita. Sähkön laatuun liittyvät standardit käsitellään niiltä osin, kuin niitä tarvitaan. Loppuyhteenvetona suoritetaan kyseisen laitoksen takaisinmaksua koskevia laskuja.

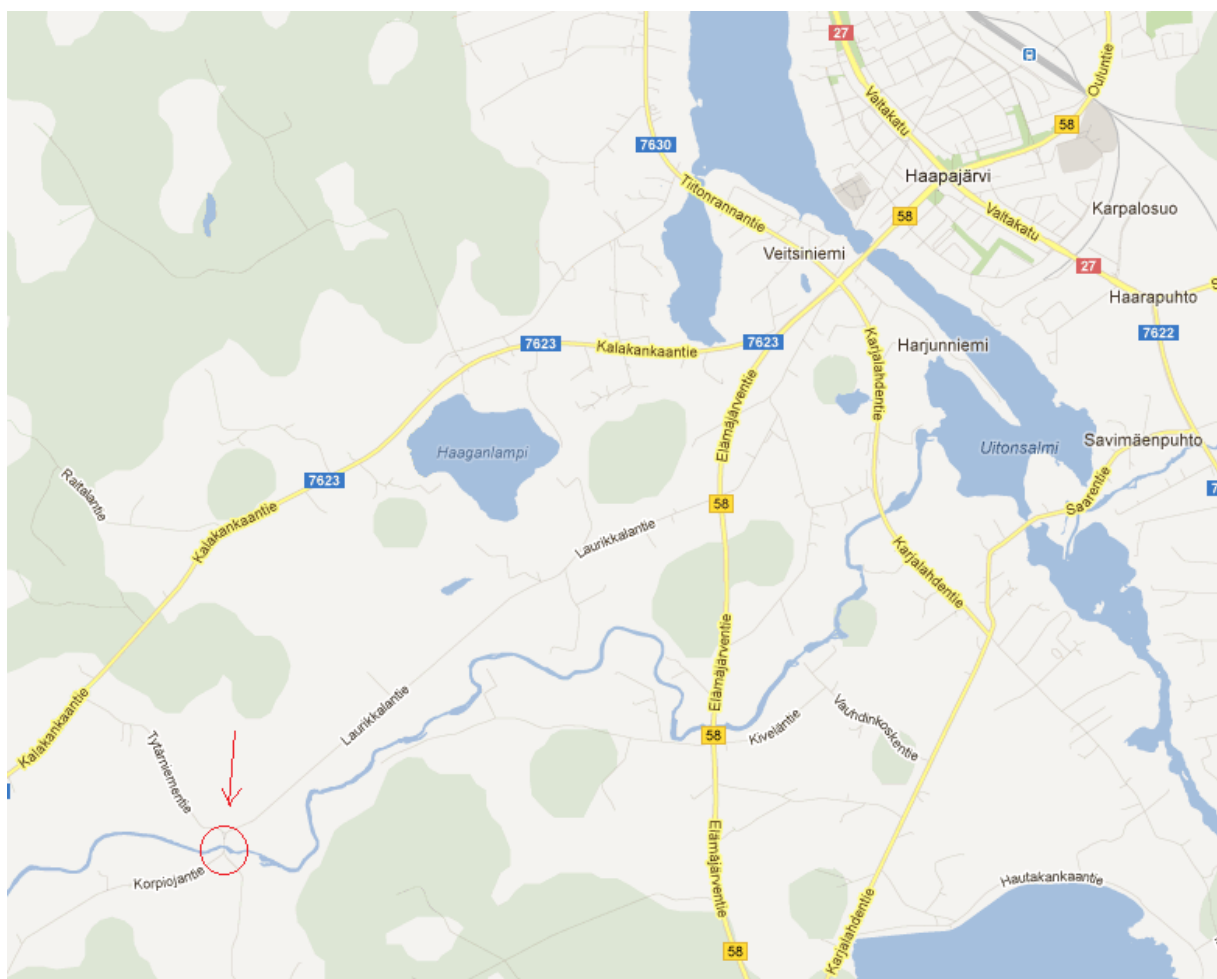


KUVIO 1. Voimalan yläjuoksu

## 2 YLEISTÄ SÄHKÖN TUOTTAMISESTA

Sähkön tuottaminen vesivoimalla Suomessa on kaikille vapaata toimintaa. Kaikki vesivoimalat voivat liittyä yleiseen sähköverkkoon ja myydä sähköä sähkömarkkinoilla. Tuotantolaitoksen pitää kuitenkin täyttää viranomaisten ja sähkölaitoksen asettamat vaatimukset. Viranomaiset valvovat ympäristövaatimuksia ja sähkøyhtiø sähkøteknisiä vaatimuksia. Kuitenkin tuottaja itse on velvollinen varmistamaan, että hänen laitoksensa täyttää asetetut vaatimukset.

(Sähkön pientuotannon verkkoon liittäminen. 2006 PDF)



KUVIO 2. Voimalan sijainti. (Google maps)

### 3 LUVAT

Voimalan rakentamiseen tarvittavat luvat määräytyy laitoksen tehon mukaan. Pienessä laitoksissa kuten tässä työssä käsiteltävä laitos, riittää pelkkä rakennuslupa. Luvan tarkoituksena on pitää suojellut maa-alueet rakentamattomina ja rakennusluvan yleiset ehdot ovat samat kuin missä tahansa muussakin rakennuksessa.

Rakennusluvan saamisen ehtoina on, ettei maa-alue kuulu minkään suojelun piiriin esimerkiksi Natura 2000 tai muu vastaava. Luvan eväämisen perusteita voi myös olla ympäristölle aiheutuvat vahingot. Luonnonsuojelualueilla päätarkoitus on pitää maisema rakentamattomana. Yleensä voimalan rakentaminen hankaloittaa kalojen nousua ylävirtaan ja tähän on kiinnitettävä huomiota jokaisen voimalan suunnittelussa ja rakentamisessa.

(Sähkön pientuotannon verkkoon liittäminen. 2006 PDF)

Tässä tapauksessa rakennusluvalle ei ollut eväämiseen johtavia seikkoja. Koskessa oli jo ennestään ollut mylly, joka oli rakennettu joskus myllyjen aikakaudella. Tästä johtuen joen koski ei enään ollut luonnonmukaisessa tilassa eikä vanhan myllyn kunnostusta ole kielletty. Tässä kohteessa kunnostus tehtiin todella perusteellisesti, niin vanhasta myllystä ei ole enään jäljellä mitään muuta kuin sama sijoituspaikka, jossa uusi voimala sijaitsee.

## 4 JAOTTELU VERKKOLIITÄNNÄN MUKAAN

Voimalat voidaan jakaa eri ryhmiin verkkoliitännänsä osalta. Ensimmäisenä tyyppinä on voimalat, jotka tuottavat sähkönsä yleisestä verkosta erotettuna suoraan erilliseen kulutukseen. Toisena tyyppinä on voimalat, jotka on kytketty yleisen sähköverkon rinnalle. Tämä erottelu määrää voimalaa koskevat sähkötekniset vaatimukset. Verkosta erotetussa voimalassa ei ole mitään yleisiä jännite- tai taajuusvaatimuksia. Erotetuissa laitteistoissa on kuitenkin voimassa normaalit sähköturvallisuuteen liittyvät asiat, ylivirtasuojaukset ja laitteiden suojausluokat.

### 4.1 Verkosta erotetut voimalat

Verkosta erotettuja voimaloita käytetään yleensä varavoimana tai niiden tuottama sähkö kulutetaan johonkin, mikä ei tarvitse jatkuvaa sähköä esimerkiksi lämmitysvastuksiin lämminvesivaraajassa. Tämä ratkaisu olisi erittäin hyvä, jos tuotanto ja kulutus olisivat lähellä toisiaan ja niiden tehot samaa kokoluokkaa. Tilanteessa, jossa oma kulutus on kaukana tuotantolaitoksesta, verkosta erotettua ratkaisua ei järkevästi pystytä hyödyntämään.

### 4.2 Verkon rinnalla toimiva tuotanto

Vesivoiman tapauksessa verkon rinnalla toimiva tuotanto on paras koska sähköön tuotto on suhteellisen tasaista, jos voimalan mitoitus on tehty oikein. Pieni voimala voi olla samassa sähköliittymässä oman kulutusliittymän kanssa pienentämässä verkosta ostetun sähkön määrää. Jos oma kulutus on isompaa kuin voimalan tuottama teho, ei ylimääräistä sähköä tarvitse siirtää yleiseen sähköverkkoon. Voimala voi myös olla omassa liittymässään oikeana tuotantolaitoksena, jonka koko tuotettu teho siirretään yleiseen sähköverkkoon ja sitä kautta sähköä ostaville kuluttajille. Tuotetun tehon mittarointi suoritetaan verkkoyhtiön toimittamalla tehomittarilla joka mittaa tehon molempiin suuntiin. Tuotetusta energiasta maksetaan tuottajalle kulutuksen ja tuotannon erotuksen jälkeen jäänyt summa.



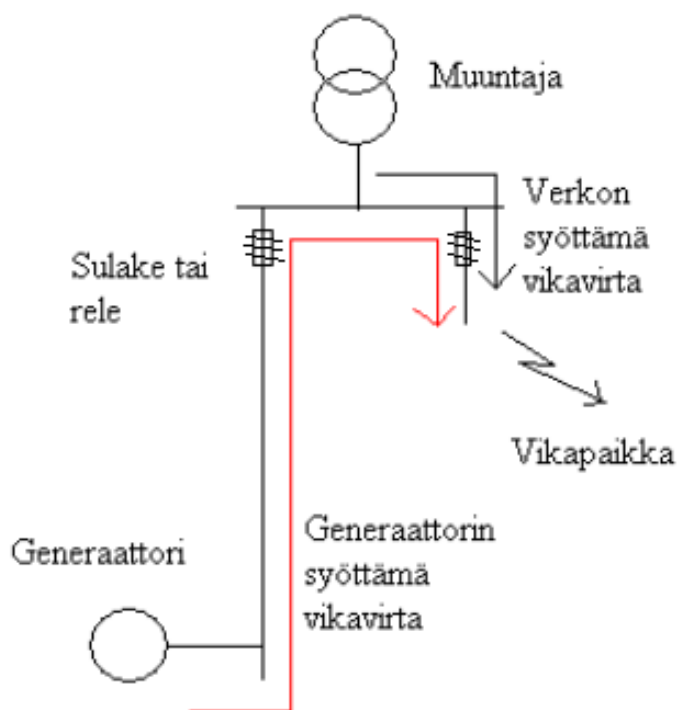
Yleisessä sähköverkossa toimivaa voimalaa säätelee jakeluverkkoyhtiön asettamat reunaehdot, jotka rajoittaa voimalan kokoa jakeluverkon ominaisuuksien mukaan.

(Sähkön tuotannon liittymisehdot. TLE11. 2011 )

## 5 SUOJAUS

Pientuotannon liittäminen sähköverkkoon on aina hieman haastavaa, koska verkko suunnitellaan kulutuksia ajatellen tämä johtaa usein säteittäiseen verkon rakenteeseen. Tästä johtuen saattaakin tulla vaikeita ongelmia suojauksen oikean ja riittävän nopean toiminnan kanssa. Pahimmassa tapauksessa voimala saattaa jäädä yksin syöttämään verkossa olevaa vikaa, oikosulkua, tai saareketta sopivissa olosuhteissa, johon pienvoimalaa ei ole tarkoitettu.

Oikein toimivan suojauksen toteuttamiseksi on pystyttävä hahmottamaan kaikki mahdolliset vikatilanteet. Suojauksessa ja suojareleiden asetteluun vaikuttaa verkon jäykkyys voimalan liityntäpisteessä ja muuntamon muiden johtolähtöjen kuormitussuojien arvot, jotka kaikki on otettava huomioon mitoituksessa.



KUVIO 3. Mahdollinen vikatilanne (Verkostosuositus YA9:09 )

Oheisessa taulukossa on esitetty tarvittavat suojareleet ja niiden laukaisurajat toiminta-aikojen kanssa. Kaksiportaisilla releilla saavutetaan parempi käytettävyys johtuen vapaammista katkaisurajoista. Verkon toiminnan kannalta on aina parasta että mahdollisia katkoja ja siitä johtuvia jänniteheilahteluja olisi mahdollisimman vähän, joten kaksiportaisten suojareleiden käyttö olisi suositeltavaa.

TAULUKKO 1. Kaksiportaisten suojareleiden asetteluarvot. (E.ON 2010)

PARAMETRI	KOKONAISAIKAHIDASTUS	LAUKAISUN RAJA-ARVOT
Ylijännite (porras 1)	1.5 s	Un + 10%
Ylijännite (porras 2)	0.15 s	Un + 15%
Alijännite (porras 1)	5 s	Un - 15%
Alijännite (porras 2)	0.15 s	Un - 50%
Ylitaajuus	0.2 s	51.0 Hz
Alitaajuus	0.5 s	48.0 Hz
YSE	0.15 s	*)
*) Laukaisuraja-asettelut sovitaan jakeluverkon haltijan kanssa riippuen valitusta YSE -suojatyyppistä Taulukon aikahidastus muodostuu releen ja katkaisijan yhteenlasketusta toiminta-ajasta. Releiden tulee olla 3-vaiheiset, paitsi taajuusreleiden, jotka voivat olla yksivaiheiset. Generaattorilaitteistoille joiden teho on $\geq 1$ MVA, edellytetään sähkölaitostyyppisiä releitä. Pienemmille laitteistoille hyväksytään teollisuusreleet.		

TAULUKKO 2. Yksiportaisten suojareleiden asetteluarvot. (E.ON 2010)

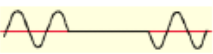
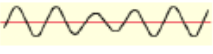
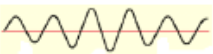
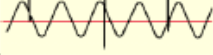
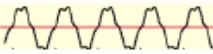
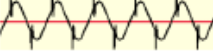
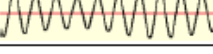
PARAMETRI	TOIMINTA-AIKA	ASETTELUARVOT *
Ylijännite	0,15 s	Un + 10%
Alijännite	1,5 s	Un - 15%
Ylitaajuus	0,2 s	51 Hz
Alitaajuus	0.5 s	48 Hz
Loss of Mains **	0.15 s	
*) Loss of Mains -suojaksen eli saarekekäytönestosuojauksen tulee käyttää jakeluverkkoon sopivia havaitsemistekniikoita.		

Vesivoiman tapauksessa verkosta irtoaminen on aina huono tilanne, koska se aiheuttaa äkillisen turbiinin pyörimisnopeuden nousun, joka taas johtaa voimalan pikasulkuun. Vesivoimaloissa joudutaan lähes poikkeuksetta tarkistamaan turbiinin ja sulkulaitteiden kunto mahdollisien vaurioiden varalta ennen kuin laitosta aletaan ajamaan uudestaan ylös.

## 5.1 Sähkön laatu

Sähkön laadulle on asetettu vaatimukset stantardeissa. Laadun määrittelyssä tarkastellaan harmonisia yliaaltovirtoja ja kytkennöistä aiheutuvia transienttiyliaaltoja. Sähkön laadun valvonta on hyvin tärkeää verkon toiminnan kannalta. Jotta verkossa pystyttäisiin siirtämään maksimaalinen teho, tulisi jännitteen pysyä mahdollisimman sinimuotoisena. Loisvirran siirtäminen myös kuormittaa sähköverkkoa täysin turhaan.

Mahdolliset häiriöpiikit jännitteessä saattaa aiheuttaa ongelmia elektronisissa laitteissa. Monesti ongelmat ilmenevät laiterikkoina elektroniikan huonon kestävyysden takia. Korkeataajuiset häiriöt saattavat häiritä etäluettavia mittareita.

Häiriötyyppi	Kuvaus	Mahdolliset syyt
Sähkön jakelun katkos (> 1min)		Huoltotoimet, linjaviat, onnettomuudet, sää, tuuli, salamet, jää
Pitkäaikainen ylijännite		Pieni kuormitus, huono säätö
Pitkäaikainen alijännite		Raskas kuorma, voimakkaat kuormitushuiput, ei loistehonsäätöä, huono tehokerroin
Hetkelliset katkokset		Katkaisijoiden laukeaminen, vian selvitystilanne, syötön vaihto
Jännitekuopat		Suurien kuormien kytkentä, hetkelliset viat, katkaisijoiden toiminta, induktiiviset kuormat
Hetkelliset ylijännitteet		Piirin kapasitanssi, suurten kuormien poiskytkentä, vaihevika
Transienttijännitteet		Valaistus, kapasitiivien kytkentä, virtasuojan laukeaminen, epälineaariset kuormat, häiriöt
Harmoniset virran yliaallot		Epälineaariset komponentit, korkeataajuiset kytkennät, TV, tietokoneet, valaistus, huono tehokerroin, laitteiden aiheuttama signaalihäiriö
Jaksolliset häiriöt (t < 0,5 sykliä)		Tehoelektroniikkalaitteet
Välkyntä		Eritaajuinen jännitteen vaihtelu, valaistus, loistehon vaihtelu
Jännite-epätasapaino		Epätasainen kuormitus, kompensointikondensaattorit, moottorit

KUVIO 4. Jakeluverkon häiriöt. (VTT. 2006 )

Yliaaltoja on sekä harmonisia että epäharmonisia. Harmoniset yliaallot ovat perustaajuuden kerrannaisia. Ne summautuvat verkkotaajuuden päälle ja aiheuttavat ylimääräisiä häviöitä laitteissa. Harmonisia yliaaltoja muodostuu epälineaarisisissa kuormissa, joiden ottama virta ei ole sinimuotoista. Tällöin säröytynyt virta aiheuttaa verkon yliaaltoimpedanssissa myös jännitteen säröytymisen. (VTT. 2006)

## 5.2 Tahdistus

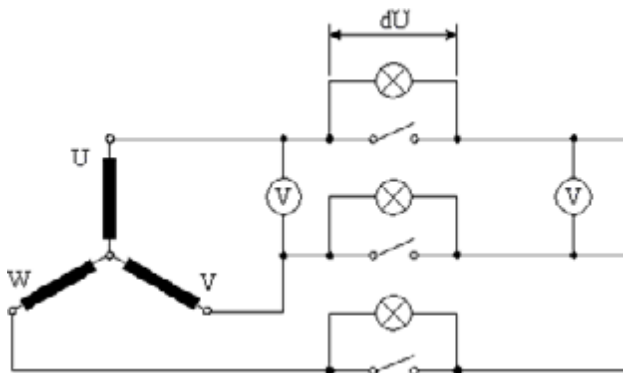
Jotta generaattori voitaisiin kytkeä verkkoon aiheuttamatta suurempaa heilahdusta, sen tuottama jännite täytyy synkronoida verkon kanssa samaan samaan tahtiin. Vaikka taajuus olisi sama kytkimen molemmilla puolilla, saattaa jänniteosoittimet olla vastakkain joka

kytkentätilanteessa aiheuttaa suuren sysäysvirran. Kytkenässä aiheutuva sysäysvirtapiikki saattaa laukaista ylivirtasuojan, ja siitä johtuen verkkoon kytkeminen ei onnistu. Väärään aikaan tapahtuvat verkkoon kytkennot aiheuttavat myös mekaanisille osille kovia rasituksia johtuen terävästä repäisystä.



KUVIO 4. synkronoskooppi (TAKOWA Oy )

Verkkoon tahdistus voidaan tehdä automaattisella tahdistuskytkimellä, joka mittaa generaattorin ja verkon tilaa etsien oikeaa kytkenähetkeä. Tätä tekniikkaa käytetään hyvin laajasti pienemmissäkin voimaloissa, koska verkkoyhtiöt yleensä vaativat automaattisen tahdistuksen verkkoonliittämiseksi.



KUVIO 5. Yksinkertainen tahdistuslaite (leenakorpinen.fi )

Manuaalisen tahdistuslaitteiston voi yksinkertaisimmillaan rakentaa verkkokytkimen yli olevilla tahdistuslampuilla ja vaiheiden välissä olevilla jännitemittareilla. Kytkenästä käytetään nimitystä pimeä kytkentä. Tällä menetelmällä kyetään näkemään verkon ja

generaattorin tuottaman jännitteen samenvaiheisuus ja taajuus. Lamput sammuvat silloin, kun jännitteen hetkellisarvot ovat samat kytkimen molemmiin puolin, jolloin verkkoonkytkentä voidaan suorittaa turvallisesti.

TAULUKKO 4. Tuotantolaitteistojen luokittelu käyttöominaisuuksien mukaan (E.ON 2011)

			Luokka	Rinnan- käynnin esto	Tahdistus	Yhteen- sopivuus- ehdot	Yksin- syötön esto	Sopimus- ehdot
Yleisestä jakelu- verkosta erossa käyvät tuotanto- laitteistot	Rinnankäyttö estetty mekaanisella kytkimellä		Lk 1	■	-	-	-	LE05 VPE2010
	Rinnankäyttö rajoitettu automaatti- sella syötönvaihdolla		Lk 2	■	■	-	-	LE05 VPE2010
Yleisen jakelu- verkon kanssa rinnankäyvät tuotantolaitteistot	Sähkön siirto jakeluverkkoon estetty		Lk 3a	-	■	■	■	LE05 VPE2010
	Sähkön siirto jakeluverkkoon sallittu	Tuottaja ei saa korvausta verkkoon siirtyneestä sähkö- stä (vain pienet mikrogeneraattorit)	Lk 3b	-	■	■	■	LE05 TLE05 TVPE11 (soveltuvien osin)
		Tuottaja myy sähköä muulle sähkökaupan markkinaosapuolelle	Lk 4	-	■	■	■	TLE11 TVPE11

LE05 = Sähkönkäyttöpaikkojen liittymisen ehdot

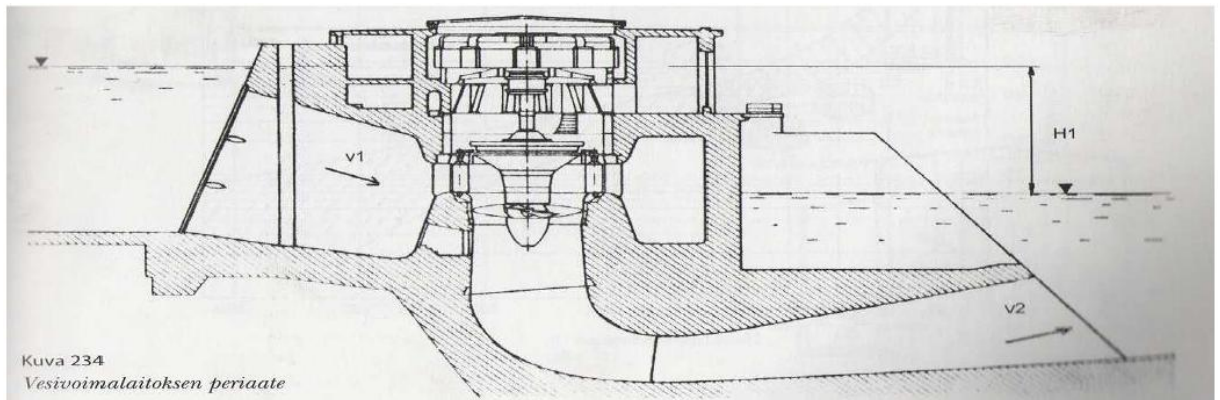
VPE2010= Verkkopalveluehdot (sähkönkäyttäjille)

TLE11 = Sähköntuotannon liittymisehdot

TVPE11 = Sähköntuotannon verkkopalveluehdot

## 6 SUUNNITTELU

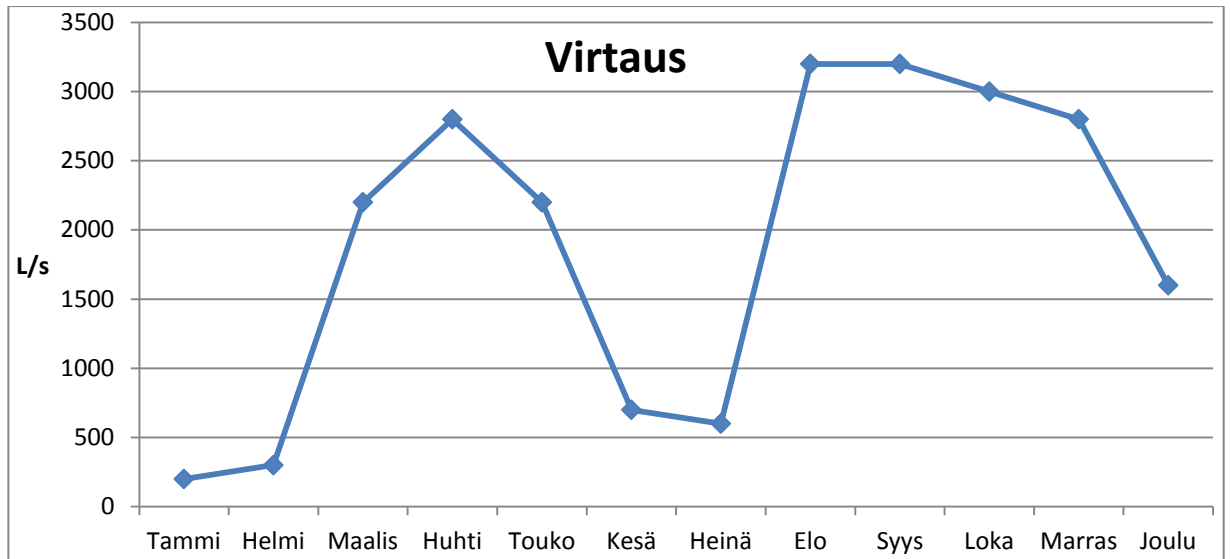
Voimalan suunnittelu alkaa aina kaikkien lähtöarvojen selvittelystä. Vesivoimassa voidaan pitää tärkeimpänä tekijänä mitoituksen kannalta kosken vedestä saatavaa tehoa, joka muodostuu putouskorkeudesta ja veden virtaamaasta. Putouskorkeuden määrittely tapahtuu mittaamalla voimalan ylävesialtaan vedenpinnan korkeus verrattuna voimalan alavesipintaan.



KUVIO 6. Voimalan putouskorkeus (Huittinen, Korhonen, Pimiä & Urpilainen 2008, 265)

Virtaaman mittäyksikkönä käytetään joko litraa sekunnissa tai kuutiota sekunnissa. Ohessa olevasta kaaviosta voidaan helposti tulkita vuoden aikana tapahtuva vesimäärän vaihtelu kuukausittain josta myös selviää virtaaman heikoin ja suurin määrä. Tehon määrittely voi olla hieman haastavaa Suomen oloissa, koska sademäärät vaihtelevat runsaasti vuoden aikana. Karkeassa suunnittelussa kannattaa lähteä laskemaan vain virtaaman keskiarvo, jolla voi sitten jatkaa suunnittelua pitemmälle turbiinin ja generaattorin mitoitukseen.

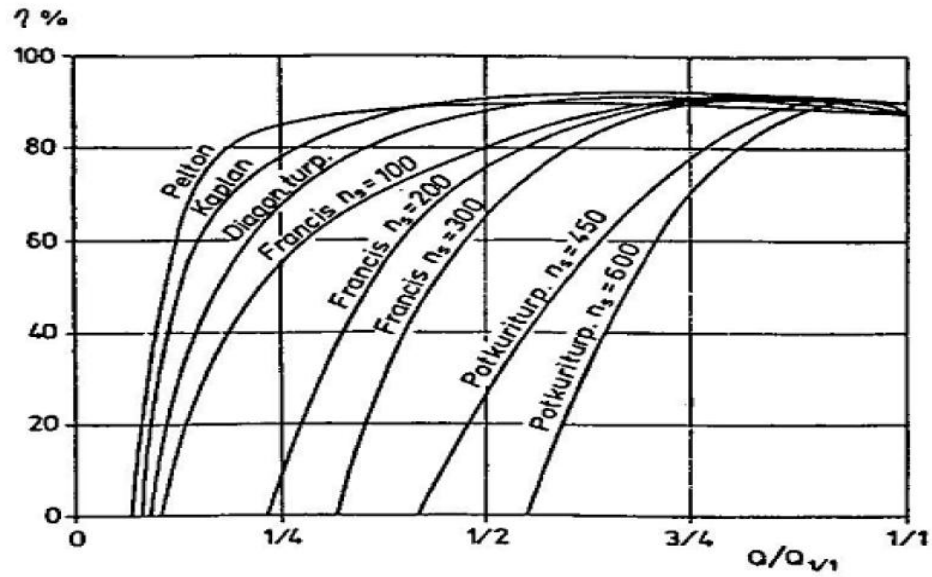




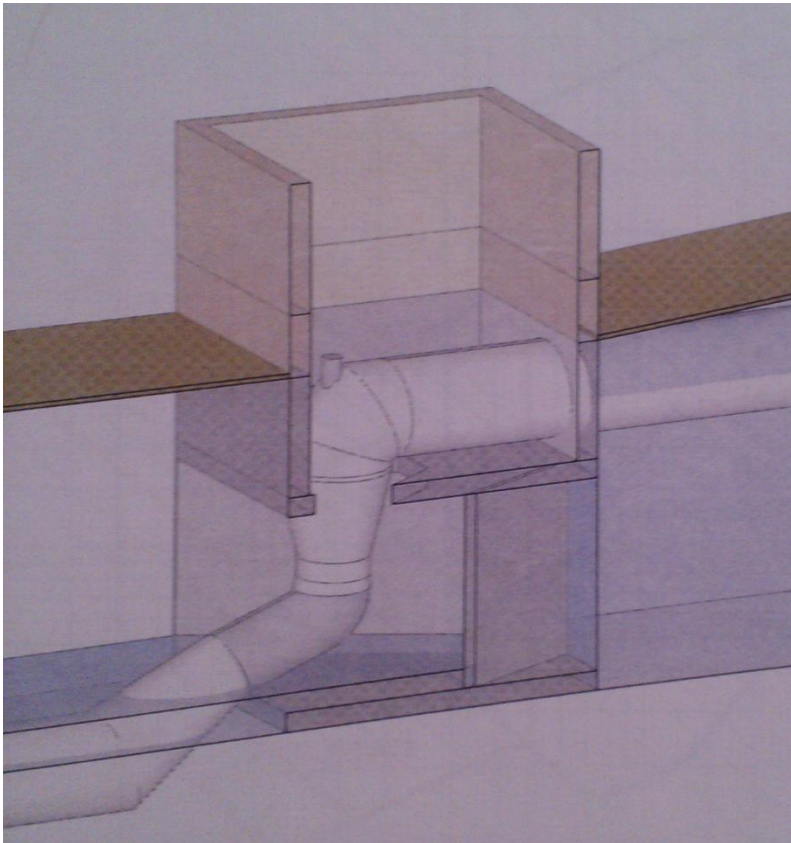
KUVIO 7. Joen virtaama vuoden aikana. ( Pasi Tytärniemi )

## 6.1 Turbiini

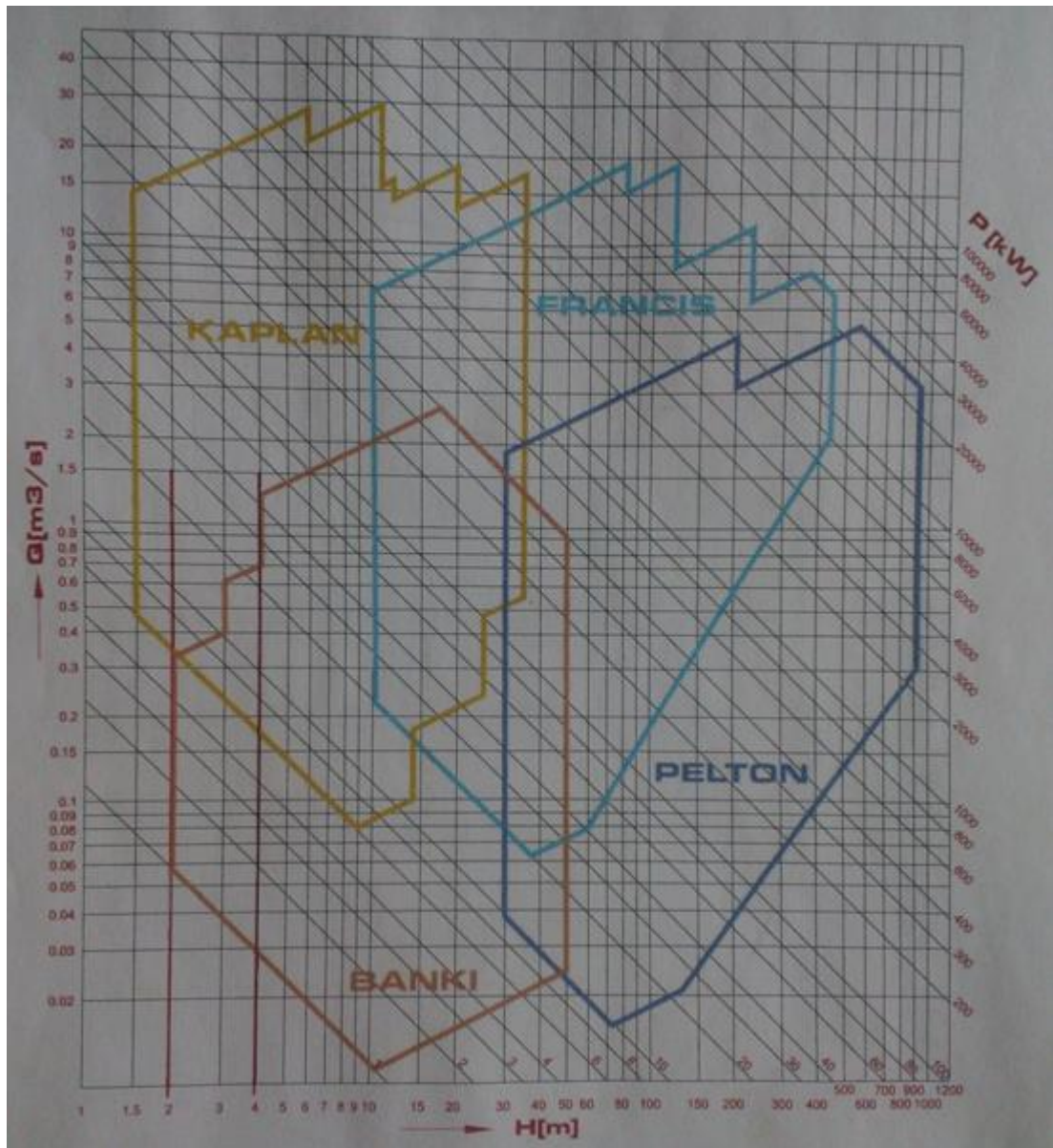
Turbiinin tehtävä on muuttaa veden potentiaalienergia akselia pyörittäväksi liike-energiaksi. Liike-energia pyörittää generaattoria, joka muuttaa liikkeen sähköksi. Yleisimmät turbiinityypit ovat Pelton-, Kaplan-, Francis- ja Potkuriturbiini. Näillä kaikilla on erilaiset ominaisuudet virtaaman, putouskorkeuden ja säädettävyyden kannalta. Pelton tarvitsee suuren putouskorkeuden toimiakseen. Näistä turbiinityypeistä Kaplan toimii pienimmällä putouskorkeudella, mutta taas vastaavasti tarvitsee suuren virtaaman tuottaakseen tehoa. Francis on ominaisuuksiltaan Kaplanin ja Peltonin välistä. Potkuriturbiini on hyvin halpa rakentaa verrattuna muihin turbiiniratkaisuihin mutta taas häviää näille hyötysuhteessa etenkin osakuormilla.



KUVIO 8. Hyötysuhdekäyriä eri turbiini tyypeillä ja ominaisuuspyörimisnopeuksilla virtaaman funktiona. (Perttula 2008,106)



KUVIO 9. Voimalan rakenne. ( Pasi tytärniemi )



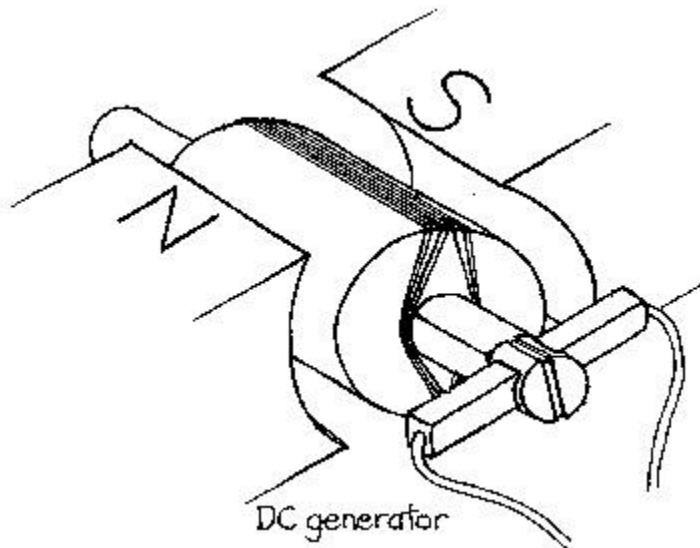
KUVIO 10. Turbiinien toiminta-alueet. (Pasi Tytärniemi)

## 6.2 Generaattori

Generaattoria valittaessa on monta eri vaihtoehtoa. Sähköä voidaan tuottaa joko tasasähkönä tai vaihtosähkönä. Näistä molemmilla on omat hyvät ja huonot puolensa. Tasasähköä siirrettäessä pitempiä matkoja sen häviöt ovat suurempia kuin vaihtosähköllä. Myös oman haasteensa tasasähkölle tuo se, että jakeluverkko toimii vaihtosähköllä, jolloin jännite joudutaan vaihtosuuntaamaan, jos se halutaan liittää yleiseen sähköverkkoon.

### 6.2.1 Tasasähkögeneraattori

Tasasähkökoneet ja generaattorit olivat aikanaan suosittuja niiden tarkan säädettävyyden ansiosta, mutta nykyisin kehittyneen tehoelektroniikan ansiosta vaihtosähkökoneet ovat suurimmalta osin syrjäyttäneet tasasähkökoneet. DC-generaattorissa magnetointi voidaan tehdä kestopäätillä tai sähköllä. Generaattorin roottoriin muodostuva pääjännite siirretään akselilta pois kommutaattorilla hiiliharjojen avulla. DC-koneella tuotettua jännitettä voidaan säätää magnetointivirralla ja akselin pyörintänopeudella, magneettin säädössä on oltava tarkkana, koska alimagnetointi johtaa koneen rynnäköitymiseen. Koneessa tuotettu teho syntyy roottorilla niin, että sen jäähtyttämiseen käytetään erillistä puhallinta joka takaa riittävän jäähtymisen roottorille.



KUVIO 11. DC-generaattori.

(<http://hsc.csu.edu.au/physics/core/motors/2696/PHY933net.htm>)

### 6.2.2 Vaihtosähkögeneraattorit

Vaihtosähkögeneraattoreissa vaihtoehtoina ovat tahtigeneraattori ja epätahtigeneraattori. Tahtigeneraattorit tarvitsevat aina herätevirran sen roottorin magneetoimiseen. Herätevirta voidaan tuoda roottoriakselille kolmella tavalla: harjallisena, harjattomana tai kestopäätillä varustettulla roottorilla, jolloin magnetointivirtaa ei tarvitse syöttää.

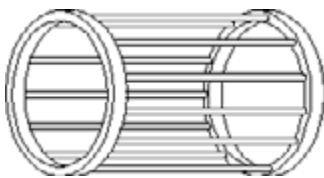
Harjallinen magnetointi tuo generaattoriin taas jatkuvaa huoltoa vaativia osia, eli hiiliharjat ja liukurenkaat joiden kuntoa on tarkkailtava. Harjaton menetelmä taas vaatisi erillisen magnetointikoneen Generaattorin akselille.

Tahtigeneraattoria voidaan myös käyttää saarekekäytössä, eli se voi syöttää yksinään kulutuskojeita. Tässä työssä tämä ominaisuus on tarpeeton, koska liittymässä ei ole omaa kulutusta jolloin voimalan ei tarvitse toimia sähkökatkon aikana. Verkkoyhtiön määräyksestä laitoksen on pysähdyttävä sähkökatkon sattuessa. Tämä parantaa verkon turvallisuutta jos joudutaan tekemään sähkölinjoille korjaustöitä, joten voimala ei syötä niin sanottua takatehoa verkon vialliseen osaan.

Kestomagneettigeneraattorilla saavutetaan yksinkertainen rakenne. Erillistä magnetointivirtaa ei tarvita. Magnetointi tapahtuu kestopagneetin avulla, joten myöskään induktiokoneen herättämisongelmaa ei ilmene. Kestomagnetoidun tahtikoneen jännitettä ei voida säätää, vaan se riippuu generaattorin ilmavälinopeudesta. Tämä tarkoittaa, että generaattorin napoihin muodostuu jännite, kun akseli pyörii. Tämän ilmiön seurauksesta, generaattorin kytkentöjen kanssa työskentelyyn täytyy kiinnittää erityistä huomiota. Koneen akseli on lukittava luotettavasti paikalleen ennen kuin kytkentäkotelo avataan, näin vältetään sähköiskun vaaralta.

Epätahtigeneraattori on rakenteeltaan generaattoreista yksinkertaisin, siinä ei ole hiiliharjoja eikä se tarvitse magnetointiin mitään erillistä magnetointikonetta. Generaattori ottaa magnetointiinsa tarvitseman virran verkossa olevasta loisivirrasta. Kuten jo koneen nimikin kertoo, epätahtigeneraattorin akselin pyörintänopeus ei ole sama, kuin koneen magneettikentän nopeus. Toiselta nimeltään oikosulkugeneraattori kertoo taas roottorin käämirakenteesta, joka on oikosulku akselin ollessa paikallaan.

( Sähkökoneet osa 1. )



KUVIO 12. roottorin häkkikäämitys.

### 6.3 Verkkoonliityntälaitteisto

Jotta voimalan generaattorin tuottama sähköteho voidaan siirtää yleiseen sähköverkkoon, tarvitaan generaattorin yhteyteen jonkinlainen verkkoonliityntälaitte. Kaikille eri generaattorityypeille tarvitaan erilaiset laitteet. DC-generaattorin tuottama jännite on tasajännitettä ja verkon jännite on vaihtojännitettä, joten tasajännite täytyy vaihtosuunnata. Vaihtosuuntaajana käytetään IGBT-siltaa.

Tahtigeneraattori tuottaa vaihtojännitettä, jolloin vaihtosuuntausta ei tarvita, kuten tasavirtageneraattorin kanssa. Generaattori on saatava pyörimään nimellisnopeutta ennenkuin se voidaan kytkeä verkkoon.

Epätahtigeneraattorin tapaus on kaikessa yksinkertaisuudessaan helpoin tapaus. Voimalatyypistä riippuen voidaan epätahtigeneraattori kytkeä verkkoon toimien aluksi moottorina, jolloin se tahdistuu verkkoon ja vasta sen jälkeen akselin nopeus nostetaan yli synkronisen nopeuden jolloin moottorista tulee generaattori. Epätahtigeneraattorin yhteydessä voidaan myös käyttää taajuusmuuttajaa, jolloin generaattoria voidaan pyörittää hyvin laajalla nopeusalueella.

## 7 TAAJUUSMUUTTAJA

### 7.1 Toiminta

Taajuusmuuttajia käytetään yleensä moottorin nopeuden muuttamisen erilaisissa sovelluksissa esimerkiksi ilmastointikoneissa tai kuljettimissa. Taajuusmuuttaja muuttaa moottorille syötettävän jännitteen taajuutta, joka muuttaa moottorin akselin pyörintänopeutta. Taajuusmuuttajien ansiosta monien laitteiden mekaaninen toteutus on tullut yksinkertaisemmaksi, koska monessa tapauksessa kallis vaihdelaatikko on voitu jättää pois. Taajuusmuuttajan avulla voidaan toteuttaa käynnistyksen yhteyteen kiihdytysramppi ja pysäyttämisenä voidaan akselin pyörimistä hidastaa jarruvastuksen avulla.

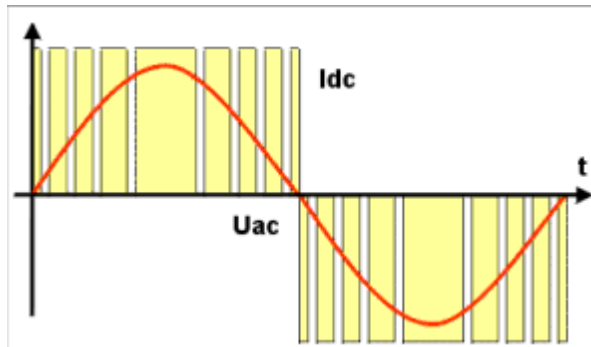
### 7.2 Rakenne

Taajuusmuuttaja koostuu neljästä pääosasta jotka ovat tasasuuntaaja, tasajännitevälipiiri, vaihtosuuntaaja ja ohjausyksikkö. Tasasuuntaaja muuttaa verkon vaihtojännitteen tasajännitteeksi. Vaihtosuuntaaja taas hakkaa tasajännitteen vaihtojännitteeksi moottorille. Ohjausyksikkö säättää vaihtosuuntaajan toimintaa sille annettujen ohjearvojen mukaan ja myös suojaaa taajuusmuuttajaa ja moottoria mahdollisilta vikatilanteilta, esimerkiksi ylikuormitukselta.

Tasasuuntaaja rakennetaan yleensä 6-pulssisena diodisiltana halvan hinnan ja yksinkertaisen toiminnan takia, tämä ei kuitenkaan toimi verkkoon syöttävässä taajuusmuuttajassa, koska diodi johtaa sähköä vain yhteen suuntaan.

Tasajännitevälipiiri toimii jännitettä tasoittavana komponenttina johon on kytketty kondensaattori poistamaan jännitteestä turhat värähtelyt. Välipiirissä voi myös olla kytkettynä induktanssi sarjaan toimien myös suotimena. Mahdollisimman tasainen välipiirin jännite parantaa taajuusmuuttajan toimintaa.

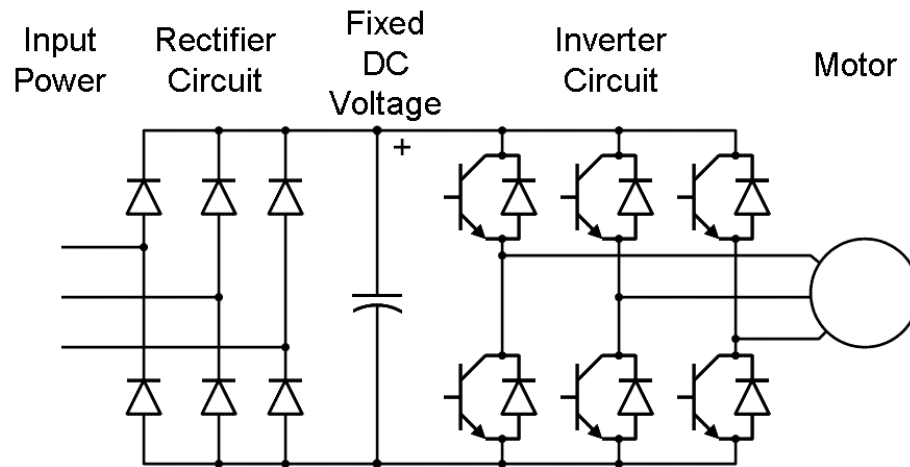
Vaihtosuuntaja osassa tapahtuu itse taajuuden muutos ja moottorille menevän virran ja jännitteen hallinta. Suuntaajan tehoasteen komponentit ovat IGBT-transistoreja. Transistorit toimivat tehoelektroniikassa kytkiminä toisin kuin tavallisessa elektroniikassa niillä säädetään jännitettä. Kytkinkäytössä säästytään isoilta tehohäviöiltä, joita säädettävä transistori tuottaa.



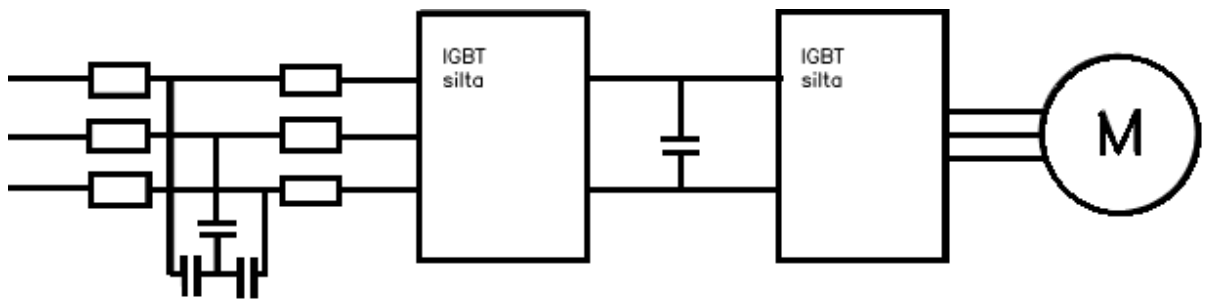
KUVIO 13. Vaihtosuunnattu jännite. (ABB )

Tasajännite hakataan vaihtojännitteeksi eri mittaisilla pulsseissa, jotta jännitteeseen saataisiin siniaallon muoto. Aallon muoto on tärkeä olla mahdollisimman lähellä siniaaltoa, koska kolmivaiheista kanttiaaltoa ei voi olla olemassa. Jännitteen vaiheiden vaihekulman ero tulisi olla mahdollisimman lähellä 120 astetta jotta välttyttäisiin maavirroilta. Vaihe-epätasapaino on erittäin haitallinen oikosulkumoottoreille tai generaattoreille koska maavirta lähtee moottorin roottorista ja menee akselin laakerointia pitkin maihin aiheuttaen laakereiden hajoamisen.





KUVIO 14. Tavallinen taajuusmuuttaja. (ABB )



KUVIO 15. Verkkoon syöttävä taajuusmuuttaja

## 8 KUSTANNUKSET

Kaikille ehkä ensimmäisenä mieleen tuleva asia suunnittelussa on laitoksen hinta ja takaisinmaksuaika. Takaisinmaksuaika määräytyy hankintahinnan ja käyttökustannusten yhteen laskettujen kulujen kattamista tuotannosta saatavalla voitolla. Tässä tapauksessa ehdottomasti suurin kustannus on tietenkin voimalan hankinta. Jos omistaja osaa itse tehdä paljon niin hankintakustannuksissa voidaan säästää merkittäviä summia. Hankintakustannuksissa voidaan saavuttaa merkittäviä säästöjä, jos laitoksen omistaja voi omalla työpanoksellaan vähentää ostettavan työn määrää. Myös joen patoamiseen saattaa kulua suuri summa rahaa jollei sijoituspaikkaa ole mietitty hyvin.

### 8.1 Käyttökustannukset

Pienissä vesivoimaloissa, joissa ei ole erillistä käytönvalvojaa, voidaan olettaa että voimalan omistaja itse huolehtii sen toiminnasta, käytöstä ja huollosta. Näihin kuluva työ ei tarvitse ottaa erikseen huomioon kustannuslaskennassa. Laitteiston hankinnan jälkeen kuluja aiheuttavat vain huoltoihin tarvittavat varaosat ja odottamattomat laitteiden rikkoutumiset.

### 8.2 Huollot

Koska voimalassa on liikkuvia osia, tarvitsee se asianmukaisen huollon. Generaattori on periaatteessa huoltovapaa laite, lukuunottamatta laakereiden tarvitsemaa rasvausta. Oikein kuormitettuna ja voideltuna laakerit saavuttavat parhaan käyttöikänsä. Turbiinin puolella lähes jatkuvaa tarkkailua ja puhdistusta vaatii välppä eli imuputken suodatinritilä, joka kerää suurimmat roskat turbiinille menevästä vedestä suojaten sitä tukkeutumiselta ja juoksupyörän siipiä rikkoutumiselta.

### 8.3 Laskelmat

Laskelmat joudutaan tekemään melko karkeilla arvoilla, koska ihan tarkkaa tietoa ei ole siitä kuinka paljon rahaa on kulutettu joen uoman muokkaustöissä, voimalan rakenteissa ja turbiinin valmistuksessa.

- Joen muokkauskulut
- Voimalan rakentaminen ja turbiini
- Sähköliittymä ja sähkölaitteisto

Kaikki rakentamiskustannukset ja laitteiston oston yhteenlaskettu summa on noin 100 000€. Kun voimala on tuottanut tätä rahamäärää vastaavan summan sähköä, on laitos maksanut itsensä takaisin. Koska tuottaja saa vähentää tuotetun energian omasta kulutuksesta, päästään takaisinmaksulaskussa yksinkertaisimpaan muotoon. Huomion arvoinen asia tässä oman kulutuksen vähentämisessä on, että itselle tuotetusta sähköstä ei kuitenkaan tarvitse maksaa valtiolle mitään tuotantoveroa. Sähkön hinta veroineen ja siirtomaksuineen on noin 15 snt/kWh. Voimalan hinta muutettuna energiaksi on 666,6 MWh.

$$\frac{100\,000\text{€}}{0,15\text{€/kWh}} = 666,6\text{MWh}$$

Voimalan keskimääräinen tuotto tuntia kohti on noin 18kWh. Tästä saadaan vuosittainen tuotanto  $18\text{kWh} \times 8760\text{h} = 157\,680\text{ kWh}$

$$\frac{666\,666\text{kWh}}{157\,680\text{ kWh}} = 4.2\text{ vuotta}$$

Tässä laskelmassa ei ole otettu huomioon mitään mahdollisia tekniikkarikkoja tai sähköverkon kaatumista, jolloin tuotanto pysähtyy. Verkon kaatuminen on hyvin todennäköistä koska voimala sijaitsee syrjäisellä seudulla, jossa on käytössä ilmajohtojärjestelmä, joka on herkkä vaurioitumaan myrskyissä. Laitoksen toimintakyvystä talvella on vaikea sanoa mitään, koska kyseistä laitosta ei ole voitu koekäyttää vielä ollenkaan. Tämän vuoksi on hyvä varautua

laskelmissa myös siihen, että talvikuukausina tuotantoa ei tule ollenkaan, joka taas pidentää takaisinmaksua. Erittäin kuivat kesätkin saattavat vähentää jonkin verran vuosittaista tuottoa.

Otetaan laskelmassa huomioon mahdolliset sähkökatkoista johtuvat tuotantokatkokset ja talvikuukausien käyttöseisokki, joka kestää joulukuun alusta helmikuun loppuun eli kolme kuukautta. Nämä yhteenlaskettuna voitaisiin olettaa, että laitos pyörii vuoden aikana kahdeksan täyttä kuukautta. Vuotuinen tuotanto energia olisi siis 105 120 kWh.

$$\frac{666\,666\text{kWh}}{105\,120\text{ kWh}} = 6.3 \text{ vuotta}$$

Takaisinmaksun aika venyy pitemmäksi, jos voimalan tuottama sähkö vain myytäisiin kuluttajille, eikä omaa käyttöä olisi. Oletetaan myytävän sähköön kilovattihinnaksi 8.35 snt/kWh. Hinnalle on perusteena valtion myöntämä takuutariffi tuulivoimalle. Jos sähköön markkinahinta menee alle 83.5 euroa megawattitunnilta, niin valtio maksaa erotuksen, jolloin tuottajalle jää minimissään tämä summa myydystä sähköstä. Pelkän takuutariffin hinnalla maksuajaksi muodostuu:

$$\frac{100\,000\text{€}}{0,0835\text{€}} = 1\,198\,000\text{kWh}$$

$$\frac{1\,198\,000\text{kWh}}{157\,680\text{ kWh}} = 7.6 \text{ vuotta}$$

Itse tuotetusta ja verkkoon kuluttajille myydystä sähköenergiasta täytyy Suomessa maksaa valmisteveroa. Tässä työssä ei tarvitse huomioida valmisteveroa, koska voimalan turbiini on riittävän pieni.

Sähköveroa ei maksa sähköntuottaja, joka tuottaa sähköä alle 50 kVA:n tehoisella generaattorilla. Sähköveroa ei maksa myöskään sähköntuottaja, joka tuottaa sähköä 50 - 2000 kVA:n tehoisessa generaattorissa ja sähköä ei siirretä sähköverkkoon. (Tulli )

## 9 TOTEUTUS

### 9.1 Turbiini

Turbiinin valintaan vaikuttavat joen virtaus ja putouskorkeus. Kalajanjoen sivu-uoman keskimääräinen virtaus on  $1,5\text{m}^3/\text{s}$  ja putouskorkeus 4 metriä. Näillä tiedoilla voidaan päätellä aikaisemmin esitetystä kuviosta, mikä turbiinityyppi sopii parhaiten voimalaan. Tässä tapauksessa turbiiniksi valikoitui Kaplan mallinen turbiini. Kaplanin hyötysuhde osakuormillakin on erittäin hyvä. Tämä ominaisuus on tärkeä kuivilla talvi- ja kesäkuukausilla, jolloin vähäisestäkin virtauksesta pystytään ottamaan maksimaalinen teho. Turbiinia on hieman muokattu soveltumaan juuri tähän kohteeseen paremmin. Johtosiivistö on toteutettu samalla tavalla kuin potkuriturbiinissa eikä Kaplanille ominaisella spiraalilla.



KUVIO 16. Turbiinin juoksupyörä  
( [http://www.alibaba.com/product-tp/111767299/Micro\\_kaplan\\_turbine\\_runners/showimage.html](http://www.alibaba.com/product-tp/111767299/Micro_kaplan_turbine_runners/showimage.html) )

## 9.2 Generaattori

Generaattoria valittaessa kaikkia eri vaihtoehtoja oli mietittävä niiden hyviä ja huonoja puolia. Tärkeimpiä valintaan vaikuttavia ominaisuuksia on hankintahinta, toimintavarmuus ja tarvittava huolto. DC-generaattorin toiminta olisi ihanteellinen tämän kaltaiseen tarkoitukseen sen laajan käyttöalueen takia. Haittapuolena laskettakoon tälle tyyppille sen suhteellisen kallis hankintahinta ja huollon tarve.

Tahtigeneraattoreissa taas ongelmaksi nousee hankintahinta. Tähän kokoluokkaan ei kannattanut hankkia tahtigeneraattoria. Isommassa laitoksessa tahtigeneraattori olisi lähes ehdoton valinta sen ominaisuuksien kannalta.

Epätahtigeneraattori nousi parhaaksi vaihtoehdoksi tässä tapauksessa sen erittäin edullisen hankintahinnan ja erittäin hyvän saatavuutensa johdosta. Tätä valintaa puoltavana tekijänä on myös generaattorin vähäinen huollon tarve. Suoralla kytkennällä huonot säätöominaisuudet voidaan korjata taajuusmuuttajan avulla jolloin saavutetaan parempi hyötysuhde käytettäessä osakuormia.

## 9.3 Verkkoonliityntä laitteisto

Liityntälaitteessa päädyttiin Schneiderin valmistamaan valmiiseen ratkaisuun joka sisältää taajuusmuuttajan, aktiivisen verkkosuotimen ja suojalaitteet. Tämän paketti kykenee syöttämään tehoa aina 90 kW:in asti. Voimalalle asetettu 20kW:n nimellistehoon nähden taajuusmuuttaja on reilusti ylimitoitettu mutta mitoituksessa otettiin huomioon mahdollinen putouskorkeuden nosto, joka tässä koskessa olisi mahdollista toteuttaa melko helposti. Voimalan padosta noin 70 metriä yläjuoksulle päin on toinen koski, jolla putouskorkeus kasvaisi ainakin metrillä hyvin helposti. Koskien välissä joen rantapenkat molemmin puolin ovat korkeat, joten niitäkään ei tarvitsisi korottaa.

Karkealla arviolla voimala kykenisi tuottamaan ainakin 50kW:n tehon  $1.5\text{m}^3/\text{s}$  virtauksella. Virtausta on kuitenkin paljon enemmän kuin  $1.5\text{m}^3/\text{s}$  keväisin ja syksyisin, jolloin kuukauden keskivirtaama saattaa nousta jopa yli kolmen kuution sekuntivirtaukseen. Näin suurta vesimäärää ei kuitenkaan voida syöttää turbiinin läpi sen pienen koon takia. Turbiinin ohijuoksutus tapahtuu luonnollisesti. Veden pinnan noustua tarpeeksi, ylimääräinen vesi pääsee voimalan ohi joen alkuperäistä koskea pitkin.

Schneiderin tarjoaman paketin sisältö:

SYSF2010502D rivikaappiin asennettu verkkoonsyöttölaitteisto 30kW oikosulkumoottorilta  
14 318,00 € ( alv 0%)

- Rivikaappi 2ov 2000x1000x500 kxlxs , lisäksi 20 cm korkea sokkeli, kaapeloinnit alakautta
- Ei sisällä kuljetusta, FCA vapaasti Nummelassa
- Toimitusaika sovitaan erikseen.

Hinta sisältää:

- Vakiodun 30 kW generaattoriliitynnän laitoksemme lisäksi
- 1/2 pv teknisen tapaamisen, jossa varmistetaan asiakkaan moottorin soveltuvuus, sekä muut toimitukselliset asiat ( Schneiderilla)
- 1 pv käyttöönottoavustuksen ( asiakkaalla, kun kytkennät täysin valmiit )
- Suomen kieliset kytkentäkuvat
- Englannin kieliset järjestelmäosien dokumentit
- Schneider suorittaa kytkennät



KUVIO 17. Schneiderin taajuusmuuttajakaappi (Schneider)



## 10 LOPPUPÄÄTELMÄ

Tehtävänä oli suunnitella ja toteuttaa voimalan sähköistys. Suunnittelu ja oikeiden laitteiden etsintä onnistui mielestäni hyvin. Työn tärkeä osa eli toteutus jäi kokonaan tekemättä johtuen työn tilaajasta. Todellista tilannetta en tiedä miksei voimalaa tehty valmiiksi asti nyt kun kaikki selvitykset on tehty. Sähköistys olisi ollut laitokseen viimeinen iso rahallinen sijoitus, jonka jälkeen se olisi voinut tuottaa sähköä ja maksaa itseään takaisin.

Toteutuksen suhteen en alkanut itse liiemmin miettimään erilaisia toteutusvaihtoehtoja, koska tilaaja oli jo hankkinut epätahtimoottorin generaattoriksi, joten ostettavia komponentteja tähän tarvitsi enään vain verkkoonliittämislaitteiston. Schneiderin valmistama verkkoonliittämlaitteisto oli avaimet käteen ratkaisu. Käytännössä taajuusmuuttajapaketti olisi ainoa käytön ja kustannusten kannalta järkevä ratkaisu.

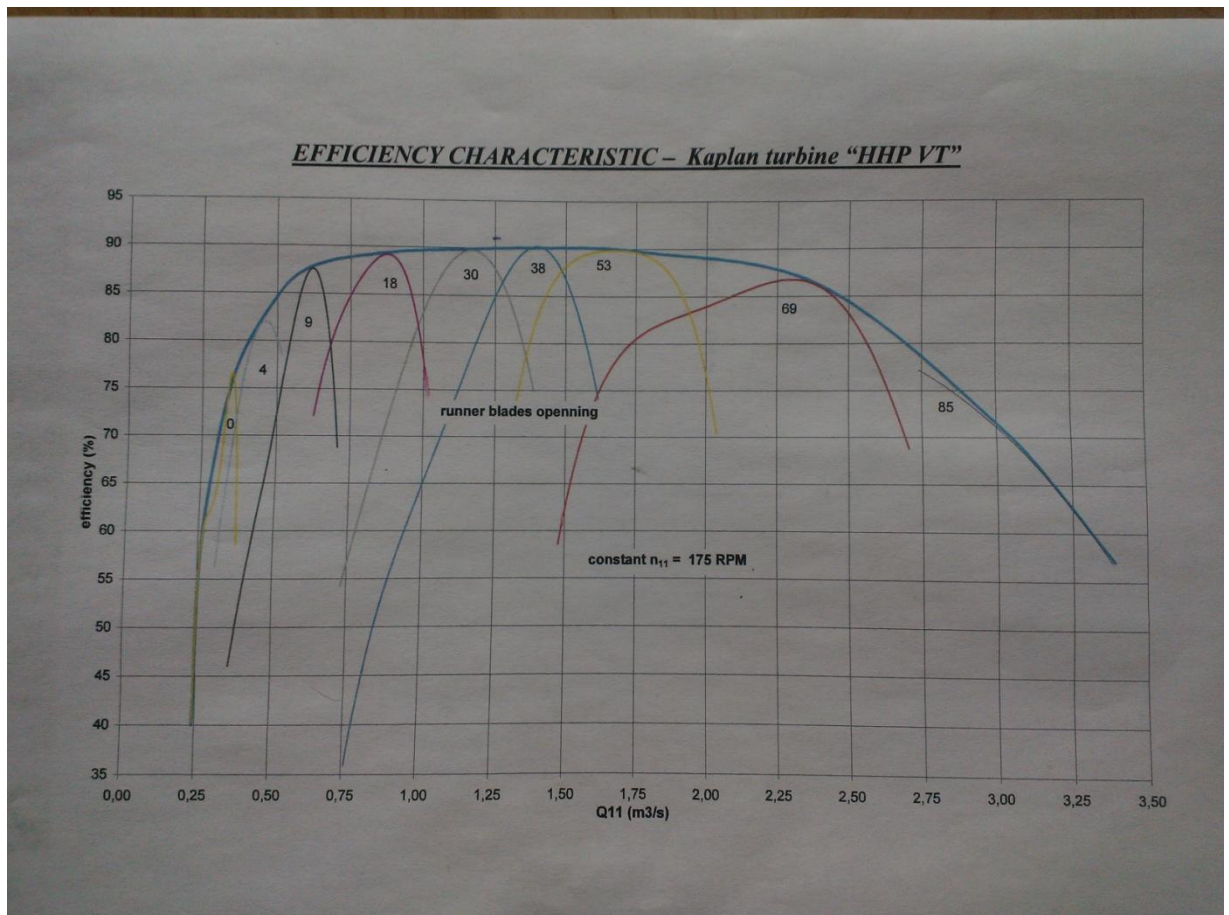
Koko toteutus olisi ollut hyvin haastava tehdä itse. Jo pelkkä verkkoon syötettävän tehon ja generaattorin pyörimisnopeuden säätöön liittyvät asiat olisivat tuottaneet ongelmia. Valmis ratkaisu on monen alansa ammattilaisen kehittämä ja testaama, joka on monessa tilanteessa parempi vaihtoehto itse rakennetulle. Osansa varmasti antaa kehitystyöhön ison yhtiön varmasti suuri rahoitus kehitysosastolle, jossa näiden laitteiden toiminta ja kestävyys hiotaan huippuunsa.

Alkuinnostus työtä kohtaan oli suuri koska homma oli hieman erilainen verrattuna edellisiin töihini. Etenkin käytännön toteutus kiinosti paljon sen erikoisuutensa takia. Mielestäni tämän kaltaisessa työssä käytännön toteutus olisi edellytys onnistuneen opinnäytetyön tekemiseen. Tärkeää tietoa olisi tullut voimalan käynnistyksestä, ohjauksen säädöistä ja etenkin tuotannon käynnistämisen jälkeisestä seurannasta. Valmiin voimalan tuotannon seuraaminen ja vertailu laskelmiin olisi antanut kuvan laskelmien oikeellisuudesta.

Omasta mielestäni työ ei onnistunut toivotulla tavalla eikä tavoitteita saavutettu. Tarkoituksena oli tehdä toimiva voimala, joka jäi rakentamatta. Tämä tosin johtui työn tilaajasta.

Työn fyysiseen toteutukseen varattu aika oli melko lyhyt, aloituksesta toimivaan voimalaan varattiin noin neljä kuukautta aikaa. Nopeasti ajateltuna tuntuu pitkältä ajalta mutta kun laitetoimittajien toimitusajat ovat lyhimmillään laitteiden kanssa kolme kuukautta, niin toteutuksen kehittelyyn ei ylimääräistä aikaa ollut. Aikataulu ei pitänyt tilaajan puolesta, eikä voimalaa olisi voitu valjastaa tuotantoon määrättyssä ajassa. Tilaaja valmisti itse turbiinin ja sen valmistaminen taisikin olla hieman haasteellisempi projekti kuin mitä oli ennen tekemistä osannut odottaa. Ongelmat tuntuivat johtuvan pääosin valitun materiaalin vaikeasta työstettävyydestä, materiaalina on ruostumaton teräs.

Ruostumaton teräs kuitenkin kestää turbiinissa lähes ikuisesti johtuen sen hyvästä korroosionkestosta joten on siksi luonnollinen valinta tämän kaltaiseen kohteeseen.



KUVIO 18. Turbiinin hyötysuhde siipikulman virtaaman suhteen

## LÄHTEET

Sähkön pientuotannon verkkoon liittäminen 2006 PDF-dokumentti

Saatavissa:

[http://www.elenia.fi/sites/default/files/Sahkon\\_pientuotannon\\_liittaminen\\_verkkoon.pdf](http://www.elenia.fi/sites/default/files/Sahkon_pientuotannon_liittaminen_verkkoon.pdf)

Luettu 4.4.2012

Sähkökoneet PDF-dokumentti

Saatavissa:

[http://www.leenakorpinen.fi/archive/svt\\_opus/10sahkokoneet\\_1osa.pdf](http://www.leenakorpinen.fi/archive/svt_opus/10sahkokoneet_1osa.pdf)

Luettu 5.4.2012

Sähkökoneet PDF-dokumentti

Saatavissa:

[http://www.leenakorpinen.fi/archive/svt\\_opus/10sahkokoneet\\_2osa.pdf](http://www.leenakorpinen.fi/archive/svt_opus/10sahkokoneet_2osa.pdf)

Luettu 5.4.2012

Tulli www-sivu

<http://www.tulli.fi/fi/yrityksille/verotus/valmisteverotettavat/energia/index.jsp>

luettu 3.9.2012

Sähkön laadun ja jakelun luotettavuuden hallinta "Alanen, Raili & Hätönen, Hannu" 2006  
PDF-dokumentti

Saatavissa:

<http://www.vtt.fi/inf/pdf/workingpapers/2006/W52.pdf>

Luettu 7.9.2012

Energiateollisuus ry Verkostosuositus YA9:09

saatavissa:

<http://energia.fi/julkaisut/mikrotuotannon-liittaminen-sahkonjakeluverkkoon-ya909>

Luettu 3.4.2012

Energiateollisuus ry LE05 Sähkönkäyttöpaikkojen liittymisen ehdot

Saatavissa:

[http://energia.fi/sites/default/files/s%C3%A4hk%C3%B6nk%C3%A4ytt%C3%B6paikkojen\\_liittymisehdot.pdf](http://energia.fi/sites/default/files/s%C3%A4hk%C3%B6nk%C3%A4ytt%C3%B6paikkojen_liittymisehdot.pdf)

Luettu 6.9.2012

Energiateollisuus ry VPE2010 Verkkopalveluehdot (sähkönkäyttäjille)

Saatavissa:

[http://www.fortum.com/countries/fi/SiteCollectionDocuments/Sahkon-siirto-ja-liittymat/Ehto\\_VPE2010.pdf](http://www.fortum.com/countries/fi/SiteCollectionDocuments/Sahkon-siirto-ja-liittymat/Ehto_VPE2010.pdf)

Luettu 20.9.2012

Energiateollisuus ry TLE11 Sähköntuotannon liittymisehdot

Saatavissa:

[http://www.helen.fi/pdf/Sahkontuotannon\\_liittymisehdot3.pdf](http://www.helen.fi/pdf/Sahkontuotannon_liittymisehdot3.pdf)

Luettu 20.9.2012

Energiateollisuus ry TVPE11 Sähköntuotannon verkkopalveluehdot

Saatavissa:

[http://energia.fi/sites/default/files/tuotannon\\_verkkopalveluehdot\\_tvpel1\\_1.pdf](http://energia.fi/sites/default/files/tuotannon_verkkopalveluehdot_tvpel1_1.pdf)

Luettu 3.10.2012

Perttula, Jarmo. 2000 Energiatekniikka. Helsinki: WSOY

Luettu 25.3.2012

## LIITE 1. Taajuusmuuttajakaapin kokoonpano

